

УДК 621.791.672.61.

Серенко А.Н.*

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ I

Рассмотрено влияние остаточных сварочных напряжений на усталостную прочность сварных соединений и конструкций. Показано, что для выявления степени влияния остаточных напряжений на выносливость необходимо использовать специальные методы оценки, исключая влияние других факторов.

Изготовление сварных конструкций практически всегда сопровождается возникновением остаточных сварочных напряжений (ОН), достигающих, как правило, в шве и околошовной зоне (ОШЗ) величины предела текучести металла. Учитывая, что сварные конструкции могут эксплуатироваться в разнообразных условиях и подвергаться действию всех видов нагрузок, включая и циклические, выявление степени влияния ОН на их работоспособность и остаточный ресурс является весьма важным [1, 2].

Различные исследователи придают разное значение влиянию ОН на эксплуатационные характеристики сварных конструкций. Так всеми признано, что сварочные ОН практически не снижают работоспособности сварных конструкций при статических и ударных нагрузках, если материал, из которого они выполнены, находится в вязком состоянии [3]. При использовании хрупкого материала или материала переведенного в хрупкое состояние ОН могут привести к понижению или повышению статической и ударной прочности в зависимости от характера распределения и знака суммарных напряжений, вызванных сваркой и внешней нагрузкой.

В оценке выносливости сварных конструкций до сего времени нет единой точки зрения на степень влияния ОН, несмотря на то, что эта проблема рассматривается уже не одно десятилетие. Одни исследователи [4,5] считают, что ОН, возникающие при сварке, будут снижать усталостную прочность конструкций и поэтому следует их устранять теми или иными способами, другие [3] считают, что роль остаточных напряжений в изменении усталостной прочности сварных конструкций несущественна.

Такое различие взглядов на роль ОН можно объяснить сложностью учета других факторов, сопутствующих процессу образования сварного соединения и получения сварной конструкции. Известно, что сварка сопровождается термомодеформационными процессами в металле шва и околошовной зоне, которые приводят к фазовым и структурным превращениям в металле, появлению необратимых деформаций, перераспределению дефектов кристаллической решетки, возбуждению полей напряжений различного рода и др. явлениям. Кроме того, для сварных соединений характерным является большое разнообразие конструктивных форм и, следовательно, концентраторов напряжений, часто являющиеся источником зарождения усталостного разрушения. Все это существенно усложняет установление действительной роли сварочных напряжений и методов их учета при проектировании сварных конструкций.

Очевидно, что однозначного решения поставленной проблемы не может быть, поэтому требуется поэтапная, дифференцированная оценка вклада каждого фактора в формирование эксплуатационной прочности сварной конструкции. Ниже приводятся некоторые результаты исследования, направленного на оценку роли ОН на усталостную прочность сварных конструкций.

Обычно для установления степени влияния ОН на прочность при переменных нагрузках, проводят сравнительные испытания трех серий образцов: из основного металла, сварные образцы и сварные образцы, со снятыми напряжениями. Для снятия или уменьшения ОН, применяют высокий отпуск сварных элементов, растяжение образцов после сварки, наведение ис-

* ПГТУ, канд. техн. наук, профессор.

кусственных ОН с целью компенсации остаточных в зоне зарождения усталостного разрушения и др. Однако, использование таких методов устранения ОН, неизбежно сопровождается привнесением новых факторов, могущих существенно изменить конечную прочность элемента, что маскирует выявление роли только сварочных напряжений на несущую способность конструкций.

Автором разработана новая методика, позволяющая оценить в чистом виде влияние остаточных напряжений на усталостную прочность при сохранении неизменными всех остальных факторов.

Рассматривая взаимодействие ОН с напряжениями от внешних сил, можно прийти к выводу, что величина ОН может быть снижена вплоть до нуля, если еще до сварки элемента к нему приложить внешнее усилие такого направления и интенсивности, чтобы оно вызвало в активной зоне (шве и ОШЗ) напряжения равные по величине тем ОН, которые образуются в этих зонах после сварки свободного элемента. Тогда, после полного охлаждения образца и снятия предварительных усилий, ОН будут снижены до значений:

$$\begin{aligned}\sigma_p &= (1-\gamma)v\sigma_T; \\ \sigma_{сж} &= (1-\gamma)v\sigma_T \frac{1}{\alpha-1},\end{aligned}\tag{1}$$

где σ_p , $\sigma_{сж}$ - остаточные напряжения в растянутой и сжатой зонах сварного элемента;

$\gamma = \sigma_{np} / \sigma_T$ - коэффициент интенсивности предварительного напряжения;

$v = \sigma_T^* / \sigma_T$ - степень изменения предела текучести металла в растянутой зоне, вызванного термодформационным циклом сварки;

$\alpha = F / F_T$ - отношение площади сечения элемента к площади, где ОН достигают предела текучести.

Таким образом, регулируя величину предварительных напряжений, можно достигнуть полного устранения ОН, сохраняя практически неизменными механические, структурные и др. свойства активной зоны, которые формировались в ней под воздействием термодформационного цикла (ТДЦ) сварки.

С целью реализации предлагаемой методики были разработаны и изготовлены специальные устройства, установки, измерительная аппаратура и образцы.

Эксперименты проводились на образцах трубчатого сечения ($D = 96$ мм, $\delta = 3$ мм), из стали типа 1Х18Н9Т. Выбор стали указанного типа, диктовался необходимостью обеспечения достаточно стабильных теплофизических свойств материала в условиях воздействия термического цикла сварки. Трубчатая форма образцов позволяет инициировать усталостное разрушение металла при циклическом изгибе именно в растянутой зоне (шов и ОШЗ), что невозможно реализовать для плоских образцов.

Комплексные испытания включали в себя измерение ОН, ТДЦ, механических свойств различных зон, проведение усталостных испытаний образцов трех серий: из основного металла, сваренных образцов в «свободном» состоянии и предварительно нагруженных изгибом.

Наложение продольного сварного шва, как на свободные образцы, так и образцы, нагруженные изгибающим моментом, осуществлялось аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом на режиме: $I_{св} = 340-370$ А, $U_{д} = 10-12$ В, $V_{св} = 33,7$ м/час. Величина изгибающего момента $M_{вн}$, выбиралась из такого расчета, чтобы предварительные напряжения в зоне наложения шва достигали величины 200 МПа.

На рис. 1 изображены эпюры остаточных напряжений в образцах, сваренных в свободном состоянии и с предварительным нагружением. Видно, что в образцах сваренных, с предварительным нагружением изгибающим моментом, после полного остывания и снятия внешнего нагружения ОН практически полностью снимаются.

Однако, предварительное нагружение, вообще говоря, может изменить ТДЦ и, следовательно, свойства металла шва и ОШЗ по сравнению со свойствами, получаемыми при свободной сварке. Поэтому возникла необходимость количественного определения степени отличия

ТДЦ шва и ОШЗ в элементах свариваемых в свободном и предварительно нагруженном состояниях.

Анализ напряженно-деформированного состояния трубчатых образцов (с учетом остаточных напряжений), свариваемых по упомянутым вариантам, позволил получить зависимость прироста деформаций металла шва и ОШЗ $\Delta\varepsilon$ этих зон от деформаций ε_{np} , вызванных изгибающим моментом $M_{вн}$ в таком виде:

$$\Delta\varepsilon = (\alpha - 1)\varepsilon_{np}, \quad (2)$$

где $\alpha = I/I_0$;

I, I_0 – моменты инерции полного поперечного сечения трубы и сечения уменьшенного на величину зоны упруго-пластических деформаций F_T , зависящей от режима сварки.

Поскольку величина предварительных напряжений не превосходит предела текучести металла, то деформации ε_{np} будут не более (0,1...0,2)%. Учитывая, что α не может быть больше 1,5, делаем вывод, что $\Delta\varepsilon \leq (0,05...0,1)\%$.

Очевидно, что свойства металла шва и ОШЗ будут практически одинаковыми для обоих вариантов сварки.

Для подтверждения сделанных выводов были проведены исследования кинетики термодеформационных циклов металла ОШЗ на тех же образцах и параметрах режима сварки.

Деформации металла в заданной зоне при сварке определяются дифференциальным способом [6, 7]. В этом способе различают деформации формоизменения (полные) ε_ϕ и две составляющих полной деформации – свободные температурные деформации ε_α и деформации от внутренних сил (т.е. деформации металла) ε , которые характеризуют внутренний процесс относительного смещения элементов, причем

$$\varepsilon_\phi = \varepsilon_\alpha + \varepsilon \quad (3)$$

В соответствии с выражением (3) для определения ε необходимо замерять функции $\varepsilon_\phi(t)$ и $\varepsilon_\alpha(t)$ на протяжении всего ТДЦ, а затем вычитать мгновенные значения одной функции из значений другой в соответствующие моменты времени.

Свободные температурные деформации рассчитываются по формуле:

$$\varepsilon_\alpha = 100\alpha_{cp}\Delta T \%, \quad (4)$$

где α_{cp} – средняя величина коэффициента линейного расширения в рассматриваемом диапазоне изменения температуры ΔT .

Измерение временных деформационных циклов при сварке производилось специальным механическим деформометром на основе электронного механатрона 6МХ1С, а температуру – хромель-алюмелевой термопарой. Устройство деформометра позволяло вести запись деформаций металла на расстоянии 2 мм и более от линии сплавления на базе измерения 5 мм.

В результате выполнения продольного шва на образце были получены осциллограммы, представляющие собой синхронизированные во времени кривые изменений температуры и деформаций, представленные на рис 2.

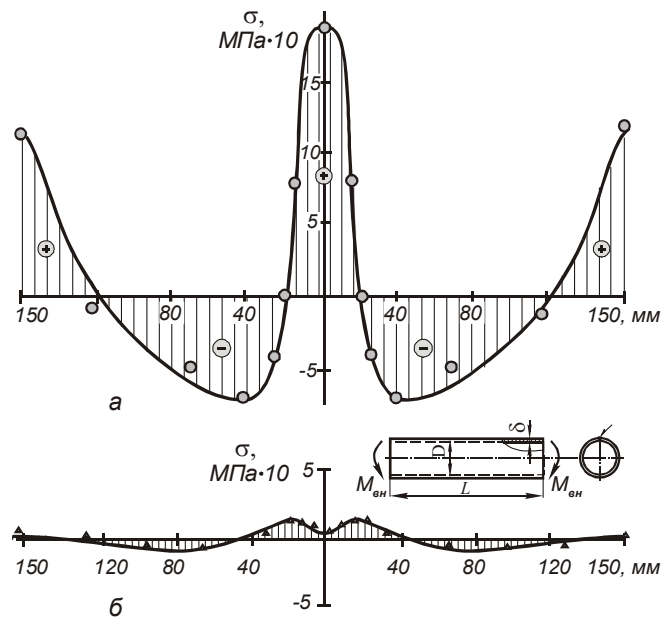


Рис.1- Эпюры остаточных напряжений в образце (развертка по диаметру) при сварке в свободном состоянии (а) и с предварительным нагружением внешним изгибающим моментом (б)

Как видно из рисунка, полученные осциллограммы по характеру и по абсолютным значениям анализируемых величин для обоих вариантов сварки довольно близки между собой. Это подтверждает высказанное выше предположение о несущественном различии ТДЦ и, следовательно, свойств металла активной зоны образцов, сваренных в свободном и нагруженном состояниях.

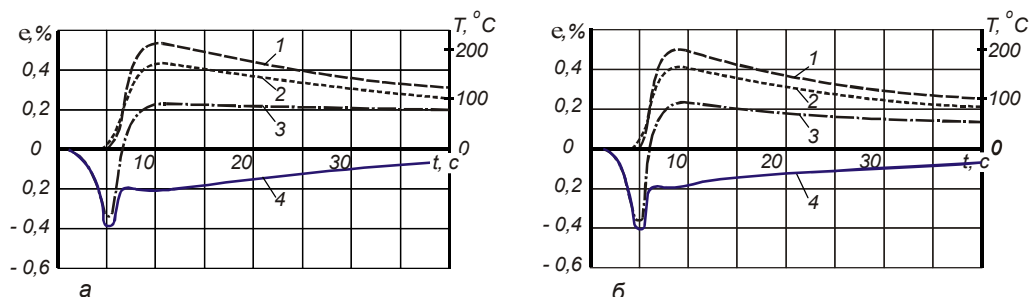


Рис.2 – Временные термодформационные циклы в околошовной зоне (4 мм от линии сплавления) при сварке образца в свободном состоянии (а) и нагруженном изгибающим моментом (б): 1 – T ; 2 – $\varepsilon_{\alpha}(t)$; 3 – $\varepsilon_{\phi}(t)$; 4 –

Завершающим этапом оценки степени влияния остаточных сварочных напряжений на усталостную прочность образцов постоянного сечения было непосредственное проведение усталостных испытаний трех серий трубчатых образцов: 1 - основной металл (образцы без шва); 2- образцы со швом, выполненным в свободном состоянии; 3 – образцы со швом, выполненным с предварительным изгибом до напряжений (в зоне шва), равных 200 МПа.

На рис.3 приведены результаты испытаний всех серий образцов. Как видно из рисунка, выносливость на базе $5 \cdot 10^6$ циклов образцов второй и третьей серии оказалась практически одинаковой (130 МПа) и значительно ниже выносливости основного металла (215 МПа). Учитывая, что в образцах, сваренных с предварительным нагружением, остаточные напряжения близки к нулю (рис. 1), можно сделать вывод, что роль остаточных напряжений в снижении выносливости образцов со сварным швом несущественна.

Снижение циклической прочности образцов со швами можно объяснить двумя возможными факторами:

1 – разупрочнением металла ОШЗ под действием термического цикла сварки;

2 – низкой сопротивляемостью литого металла шва циклическим нагрузкам.

Для подтверждения первого предположения были проведены статические испытания на растяжение образцов из основного металла и сварного соединения, вырезанных таким образом, чтобы их рабочая часть включала шов и ОШЗ. Результаты испытания приведены в таблице.

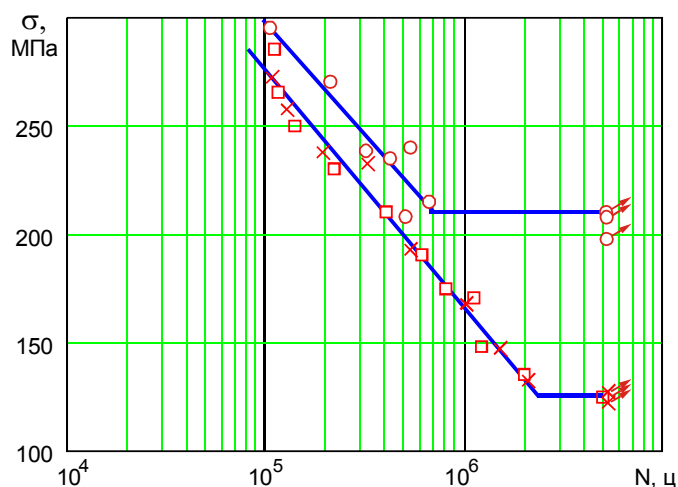


Рис. 3 – Результаты усталостных испытаний трубчатых образцов: \circ - основной металл; \square – сварка в свободном состоянии; \times - сварка с предварительным изгибом

Таблица – механические свойства стали 1Х18Н9Т и сварного соединения

Место вырезки образцов	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{σ} , МПа	δ , %	ψ , %
Основной металл	440	600	34	65
Сварное соединение	300	580	32	63

Сравнивая механические характеристики основного металла и сварных соединений, можно видеть, что предел текучести сварного соединения на 32% меньше предела текучести ОМ, что, по-видимому, и привело к снижению циклической прочности образцов со швом.

Необходимо, однако, отметить, что при использовании для сварных конструкций других марок сталей возможно получение иных результатов по изменению свойств активной зоны, происходящих под действием ТДЦ сварки и, следовательно, будут другие соотношения величин усталостной прочности элементов с остаточными напряжениями и без них.

Таким образом, предлагаемый метод оценки степени влияния остаточных напряжений на усталостную прочность, позволяет получить сведения, показывающие действительную роль ОН в усталостной прочности сварных элементов, что обеспечит более надежный расчет сварных конструкций.

Поскольку в данной работе анализировался наиболее простой вариант выполнения сварного шва и формы образца (с методической точки зрения), то представляет интерес выявить степень влияния остаточных напряжений на выносливость при одновременном действии других факторов, влияющих на циклическую прочность. Наибольший интерес представляет влияние концентрации напряжений при наличии ОН.

Предложенный научный подход к решению рассматриваемой проблемы позволит выявить долевой вклад каждого из названных факторов на работоспособность сварных элементов и конструкций при переменных нагрузках. Рассмотрение данного вопроса будет продолжено во второй части.

Выводы

1. В настоящее время нет единого мнения о степени влияния остаточных сварочных напряжений на усталостную прочность сварных конструкций, что объясняется трудностью выявления в чистом виде только их действия.
2. Используя предварительное нагружение элементов до сварки, можно практически полностью устранить остаточные свойства напряжений после разгрузки при сохранении одинаковыми всех остальных процессов, сопровождающих сварку.
3. Для сварных элементов, не имеющих концентрации напряжений, изменение усталостной прочности происходит не вследствие вредного влияния остаточных сварочных напряжений, а за счет локального изменения свойств металла в зоне сварного шва.

Перечень ссылок

1. Патон Б.Е.. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций / Б.Е. Патон // Автоматическая сварка. – 2003. – №10-11. – С. 7-13.
2. Махненко В.И. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации / В.И. Махненко // Автоматическая сварка. – 2003. – №10-11. – С. 112-121.
3. Окерблом Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н.О. Окерблом. – М.–Л.: Машиностроение, 1964.– 419 с.
4. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. АН УССР. Ин-т электросварки им. Е.О. Патона // Под ред. В.И. Труфякова. – К.: Наукова думка, 1990. –256 с.
5. Кудрявцев И.В. Усталость сварных конструкций / И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченков. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.
6. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке: В 3 т. / Н.Н. Прохоров // Т.2. Внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
7. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. – М.: Машгиз, 1968. – 236 с.

Статья поступила 05.05.2005